

بررسی تجربی تأثیر عامل هندسی و ضریب شکست نوری در متمرکزکننده‌های خورشیدی لومینسانسی

کامبیز حسین‌پناهی^۱، محمد حسین عباسپورفرد^{۲*}، الهه گوهرشادی^۳ و محمود رضا گلزاریان^۴

چکیده

توسعه گلخانه‌های نوین مبتنی بر روش‌های جدید کشت یکی از مهمترین راه‌کارها برای افزایش تولید غذا در دنیا است. اما با وجود تولید بیشتر محصول، مصرف انرژی در آنها بسیار زیاد است. برای حل معضل انرژی در این گلخانه‌ها، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان یک منبع انرژی دائمی در سال‌های اخیر توسط دانشمندان پیشنهاد شده است. در این میان، فتوولتاییک به دلیل ویژگی‌های بارز، تناسب و سازگاری بسیار خوبی با محیط‌های کشاورزی و همچنین سازه گلخانه، به‌عنوان یک منبع انرژی دائمی و کارا توسط محققان زیادی بررسی شده است. نتایج تحقیقات نشان داده است که برای توسعه پوشش‌های فتوولتاییکی مخصوص گلخانه علاوه بر بازده فتوولتاییکی مناسب، داشتن شفافیت در محدوده مرئی برای رشد گیاه در گلخانه ضروری است. یکی از فناوری‌های قابل که ضمن داشتن شفافیت، می‌تواند به‌عنوان یک پوشش شفاف فتوولتاییکی مخصوص گلخانه استفاده شود، متمرکزکننده‌های خورشیدی لومینسانسی (LSC) است. این ابزار فتوولتاییکی دارای چند جزء و موجبر یکی از اجزاء بسیار مهم آن است و بهینه‌سازی آن از طریق عامل‌عوامل فیزیکی مانند عامل هندسی و ضریب شکست نوری می‌تواند عملکرد LSC را بهبود ببخشد. بر همین اساس، در این پژوهش با در نظر گرفتن معیارهای یک پوشش گلخانه‌ای و یک پنل فتوولتاییکی، به بررسی دو موجبر از جنس شیشه و PMMA در ساخت LSCها برای بررسی اثر عامل هندسی و ضریب شکست نوری و تأثیر آنها در بازده نوری و بازده کلی LSCها پرداخته شد. نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت موجبر از ۴ به ۶ میلی‌متر که موجب کاهش مقدار عامل هندسی آن می‌شود و همچنین استفاده از موجبر با جنس PMMA در مقایسه با شیشه، که علاوه بر داشتن استحکام و شفافیت در ناحیه مرئی دارای ضریب شکست بالاتری (۱/۴۶) است، می‌تواند به ترتیب باعث افزایش PCE و بازده نوری LSC از ۰/۳۳٪ به ۱٪ و ۰/۹۸٪ به ۴/۲۷٪ شود.

واژه‌های کلیدی: غذا، گلخانه‌های نوین، فتوولتاییک، متمرکزکننده‌های خورشیدی لومینسانسی، موجبر.

ارجاع: حسین‌پناهی ک. عباسپورفرد م. ح. گوهرشادی ا. و گلزاریان ر. م. ۱۴۰۲. بررسی تجربی تأثیر عامل هندسی و ضریب شکست نوری در متمرکزکننده‌های خورشیدی لومینسانسی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۹: ۲۱-۳۲. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14152.635>

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- استاد گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد.

۴- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

* نویسنده مسئول: abaspour@um.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۸

مقدمه

یکی از راه‌کارهای افزایش تولید محصولات کشاورزی، توسعه سامانه‌های کشت جدید گلخانه‌ای مانند کشت عمودی و ترکیب آن با روش‌های نوین مانند آب‌کشت و هواکشت است. در این سامانه‌ها، به دلیل کنترل کامل شرایط محیطی و عامل‌عامل مهم در رشد محصول مانند نور، دما، رطوبت، مواد مغذی، نیتروژن و غیره، بازده تولید محصول افزایش می‌یابد (Allardyce *et al.*, 2017). با وجود بالا رفتن بازده تولید محصول، مصرف انرژی و به‌ویژه الکتریسیته در این روش‌های نوین، تولید غذا افزایش می‌یابد و در مواردی در مقایسه با گلخانه‌های سنتی به ۸۰ برابر رسیده است (Avgoustaki & Xydis, 2015; Lages Barbosa *et al.*, 2021). از طرفی، موضوع تأمین انرژی ارزان، دائمی و سازگار با محیط زیست که علاوه بر سود اقتصادی در دراز مدت و حل معضل انرژی در گلخانه‌ها، کمترین اثر مخرب بر محیط زیست را در پی داشته باشد و در چرخه تأمین غذای سالم و با کیفیت ایفای نقش کند، همواره یکی از چالش‌های پیش‌رو کشاورزان بوده است. در سال‌های اخیر، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و به‌ویژه انرژی فتوولتاییک به‌عنوان یکی از روش‌های تأمین انرژی در گلخانه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. اغلب تحقیقات و حتی کارهای تجاری انجام شده در این زمینه معطوف به استفاده از سلول‌های خورشیدی فتوولتاییکی نسل اول یعنی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بوده است. در این کارها اغلب از سلول‌های سیلیکونی رایج به صورت ردیفی و بعضاً به صورت شطرنجی (یک در میان) و یا در مواردی با سامانه‌های دنبال‌کننده خورشیدی بر روی سقف گلخانه استفاده شده است (Allardyce *et al.*, 2017; Hassanien *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2014; L. Lu *et al.*, 2020; Ntinis *et al.*, 2019). مختلف در نصب پنل‌های فتوولتاییک سیلیکونی رفع مشکل سایه‌اندازی آن‌ها است که باعث اختلال در رشد گیاه در گلخانه می‌شوند. بررسی نتایج تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که مشکل سایه‌اندازی سلول‌های خورشیدی در گلخانه‌های فتوولتاییکی همچنان یکی از چالش‌های مهم در این زمینه است (Lu *et al.*, 2022). برای حل این چالش، استفاده از پوشش‌های شفاف یا نیمه شفاف فتوولتاییکی مبتنی بر

فناوری‌های جدید و مواد پیشرفته، به‌ویژه سلول‌های خورشیدی نسل سوم مانند سلول‌های خورشیدی حساس به رنگدانه، سلول‌های خورشیدی پلیمری و یا استفاده از سایر فناوری‌های فتوولتاییکی جدید مانند متمرکزکننده‌های خورشیدی لومینسانسی که ضمن شفافیت در محدوده طیف خورشیدی PAR^۱، می‌توانند سایر طول موج‌های خورشیدی را جذب و تبدیل به الکتریسیته کنند، برای استفاده به عنوان پوشش فتوولتاییکی مخصوص گلخانه توسط محققان پیشنهاد شده است (Benetti & Rosei, 2022; L. Lu *et al.*, 2020, 2022; Ntinis *et al.*, 2019).

در این بین متمرکزکننده‌های خورشیدی لومینسانسی (LSC)^۲ به دلیل ویژگی‌های بارزی مانند امکان جذب تمام نور مستقیم و پراکنده محیطی و عدم نیاز به دنبال‌کننده خورشیدی، ساخت ساده و ارزان، امکان کنترل رنگ و شفافیت دلخواه از طریق مهندسی ساختار مولکول‌های لومینفور، سازگاری با محیط‌های کشاورزی و طول عمر بالا پتانسیل بالایی برای استفاده به عنوان پوشش‌های شفاف فتوولتاییکی گلخانه‌ای دارند (Benetti & Rosei, 2022; Corrado *et al.*, 2016; Essahili *et al.*, 2022). متمرکزکننده‌های خورشیدی لومینسانسی در واقع از یک موجبر شیشه‌ای یا پلیمری پوشانده شده یا Dop شده با یک ماده لومینسانسی تشکیل شده که نور در یک محدوده طیفی توسط این ماده لومینسانس جذب و در یک محدوده طیفی دیگر با طول موج بزرگ‌تر در داخل موجبر نشر می‌یابد. نور نشر یافته از طریق لبه‌ها به نوارهای نازکی از سلول خورشیدی می‌رسد و توان الکتریکی تولید می‌شود (شکل ۱) (Mazzaro & Vomiero, 2018).

یکی از اجزاء مهم یک LSC، موجبر^۳ است. موجبر و عامل‌عامل فیزیکی مربوط به آن مانند عامل هندسی^۴ (G) و ضریب شکست نوری^۵ (n) از عوامل تأثیرگذار در بازده LSC محسوب می‌شوند (Liu *et al.*, 2020; Sychugov, 2020).

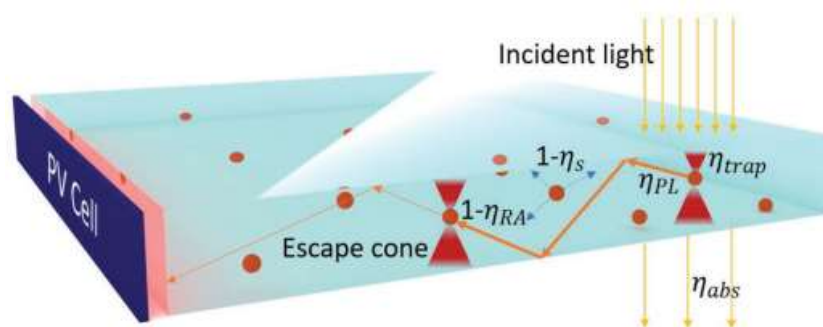
1- Photosynthesis Active Radiation (PAR)

2- Luminescent Solar Concentrator (LSC)

3- Waveguide

4- Geometric factor

5- Refractive Index



شکل ۱- شماتیک یک متمرکز کننده خورشیدی لومینسانسی (LSC). در شکل برخی از مهمترین تلفات نوری پس از ورود نور به موجبر نشان داده شده است. η_{trap} مربوط به بازده نوری است که در داخل موجبر به دام می‌افتد و به مقدار ضریب شکست نوری و زاویه بحرانی وابسته است. η_{RA} مربوط به بازده تلفات نوری در اثر باز جذب نور توسط خود مولکول‌های لومینفور بعد از نشر است (همپوشانی بخشی از طیف جذب و نشر). η_s مربوط به بازده ناشی پراکندگی نوری در موجبر است. η_{abs} مربوط به بازده جذب نور توسط مولکول‌های لومینفور LSC است. مخروط فرار (Escape cone) در واقع محدوده‌ای از تلفات نوری است که با زاویه بحرانی تعیین می‌گردد و اگر زاویه نور تابشی از زاویه بحرانی موجبر کوچک‌تر باشد، نور از صفحه خارج می‌گردد (Li et al., 2015; Mazzaro & Vomiero, 2018).

بازده LSC ارائه گردد. همچنین ماده لومینسانس مورد استفاده در ساخت LSC در این تحقیق نقاط کوانتومی کربن (CQD) است که به دلیل داشتن قابلیت جذب کامل نور فرابنفش که یک طیف مضر برای گلخانه است، گزینه خوبی برای استفاده در LSCها برای توسعه پوشش-های شفاف فتوولتاییکی گلخانه‌ای محسوب می‌شود.

مواد و روش‌ها

سنتر نقاط کوانتومی کربن

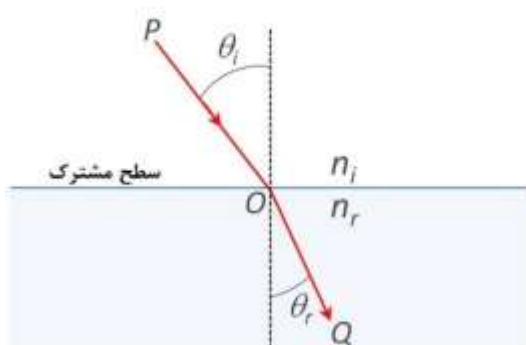
برای سنتر نقاط کوانتومی کربن برای استفاده در متمرکزکننده‌های خورشیدی لومینسانسی از روش میکروویو که روشی ساده، ارزان و سریع است استفاده شد (Wei et al., 2020). در این روش، از اسید سیتریک و اوره به عنوان پیش ماده‌های اولیه منابع کربنی و نیتروژنی استفاده شد. برای حذف پدیده AIQ یا افت در اثر تجمع ذرات بعد از سنتر که موجب کاهش اثرات فتولومینسانسی ذرات می‌شود، از NaOH برای جلوگیری از این پدیده استفاده شد. به همین ترتیب، ۰/۰۵۲ مول اسید سیتریک، ۰/۳۳۳ مول اوره، ۲۰ میلی‌لیتر آب یون‌زدایی شده و ۰/۰۲ مول NaOH، با هم مخلوط شدند. برای همگن‌سازی بهتر، مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه تحت امواج فراصوت قرار گرفت. سپس مخلوط در میکروویو تحت

عامل هندسی که به ابعاد LSC مربوط می‌شود، عبارت است از نسبت مساحت سطح رویی LSC به مساحت لبه-های آن، که تأثیر مستقیمی بر روی بازده نوری LSC دارد. علاوه بر عامل هندسی، ضریب شکست نوری دیگر عامل مهم در موجبر است. این موضوع در انتخاب جنس موجبر بسیار حائز اهمیت است. از دیدگاه فتوولتاییکی و نوری، با توجه به تلفات نوری که در داخل موجبر در زمان نشر نور وجود دارد، در انتخاب جنس موجبر باید به ضریب شکست نوری ماده توجه کرد و این عامل یکی از مهمترین عوامل در تعیین جنس موجبر باشد.

بر همین اساس در این پژوهش با توجه به نوع کاربری LSC در این کار که هدف توسعه پوشش فتوولتاییکی مناسب گلخانه است، با در نظر گرفتن معیارهای یک پوشش فتوولتاییکی مانند شفافیت (شفاف نسبت به طیف مرئی خورشید) و استحکام مناسب برای شرایط محیطی سخت و همچنین در نظر گرفتن معیارهای یک سلول خورشیدی خوب مانند بازده و طول عمر مناسب، از میان پوشش‌های رایج گلخانه‌ای که قابلیت استفاده به عنوان موجبر را دارند، دو جنس شیشه و PMMA با دو ضریب شکست نوری متفاوت در سه ضخامت ۴، ۵ و ۶ میلی‌متر برای بررسی تجربی اثر ضریب شکست نوری و عامل هندسی بر روی بازده نوری و فتوولتاییکی متمرکزکننده‌های خورشیدی لومینسانسی انتخاب شدند تا شناخت و درک صحیحی از تأثیر این عامل‌ها بر روی

تحلیل‌های طیف سنجی PL و UV-Vis با غلظت mg/ml 05/0 آماده شد. طیف سنجی PL متمرکز کننده‌های خورشیدی لومینسانسی ساخته شده با استفاده از دستگاه طیف سنج بازتابی مجهز به فیبر نوری متصل به شبیه‌ساز خورشیدی اندازه‌گیری شد. ضریب شکست شیشه و PMMA با استفاده یک منبع نوری و روابط مربوط به محاسبه ضریب شکست (معادله (۱)) اندازه‌گیری شد (شکل ۲) (Wilson, 2010).

$$n = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} \quad (1)$$



شکل ۲- شماتیک روش محاسبه ضریب شکست نوری موجبرها. در این روش ابتدا نور تحت زاویه‌ای مشخص (θ_i) به موجبر تابیده شد و پرتو نور خارج شده از صفحه نیز در صفحه مشخص و زاویه شکست (θ_r) آن اندازه‌گیری شد. در نهایت برای محاسبه ضریب شکست نوری در هر موجبر از معادله (۱) استفاده شد.

اندازه‌گیری‌های فتولتاییکی

بازدهی کلی و بازدهی نوری LSCها در زیر یک شبیه‌ساز خورشیدی تحت شرایط استاندارد A.M. 1.5 در دمای ۲۵ درجه سلسیوس (1000 W/m^2) اندازه‌گیری شد. منحنی جریان-ولتاژ توسط دستگاه اندازه‌گیری جریان-ولتاژ متصل به شبیه‌ساز خورشیدی به دست آمد. سایر عامل‌ها شامل جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز، ضریب پرتابی و بازده کلی از منحنی جریان ولتاژ استخراج شد. از یک سلول PV تنظیم شده (Zolix QE-B1) برای اندازه‌گیری بازده کلی یا بازده تبدیل توان LSCها استفاده شد. سلول‌های فتولتاییکی به طور مستقیم در لبه‌های LSC (منطقه فعال هر لبه: $0.16 \text{ cm}^2 \times 5$) نصب شد. برای اندازه‌گیری بازده کلی (PCE) η ، عامل هندسی (G) و بازده

توان ۱۰۰۰ وات به مدت ۳ دقیقه قرار گرفت. در نهایت، ساختار اسفنجی شکل گرفته با اتانول شستشو و سپس سانتریفیوژ شد تا ناخالصی‌های اضافی حذف شوند. در مرحله آخر، پودر شستشو داده شده در اجاق خلاء تحت دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۲ ساعت قرار گرفت تا پودر نقاط کوانتومی کربن به‌طور کامل خشک شود.

ساخت متمرکز کننده‌های خورشیدی لومینسانسی

برای ساخت لایه حاوی ماده لومینسانس که در این کار نقاط کوانتومی کربن است، ابتدا ۱ گرم PVP در ۱۰ میلی لیتر متانول حل و سپس ۱ درصد جرمی از نقاط کوانتومی کربن سنتز شده در مخلوط حل شد. همگن‌سازی کامل مخلوط توسط امواج فراصوت انجام شد. به‌طور هم‌زمان موجبرهای از جنس شیشه و PMMA با ابعاد $5 \times 5 \times 0.16 \text{ cm}^3$ سه بار با آب و اتانول و استون (تنها برای شیشه) در حمام فراصوت برای حذف آلودگی‌های سطحی شستشو داده شدند. سپس به روش لایه نشانی دکتر بلید، لایه‌ای از مخلوط نقاط کوانتومی کربن و PVP بر روی موجبرها لایه نشانی شدند. لایه‌ها برای خشک شدن در هوای محیط قرار گرفتند. در نهایت LSCها برای انجام تحلیل‌های نوری و فتولتاییکی آماده شدند.

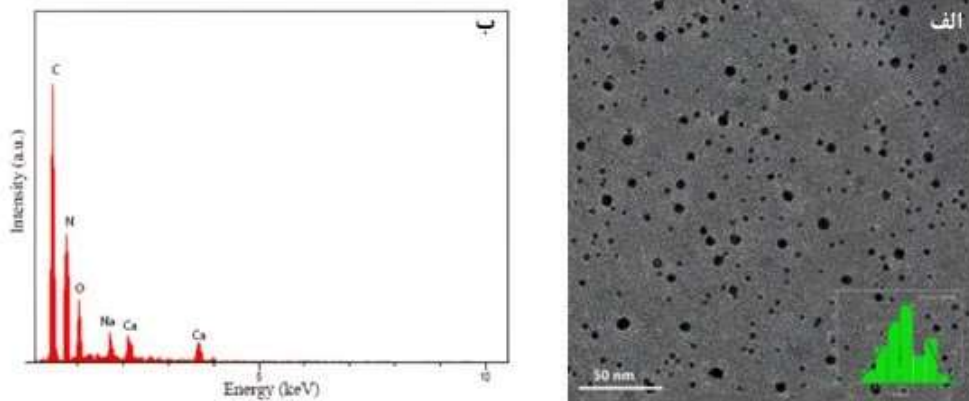
اندازه‌گیری‌های نوری

تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از نقاط کوانتومی کربن با استفاده از دستگاه TEM Philips EM 208S مجهز به یک طیف سنج EDS تهیه شد. همچنین، تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری با قدرت تفکیک بالا (HRTEM) با استفاده از یک FEI مدل TEC9G20 در ۲۰۰ کیلو ولت به دست آمد. الگوی XRD با استفاده از دستگاه پراش اشعه ایکس مدل Explorer شرکت GNR اندازه‌گیری شد. طیف FTIR توسط یک طیف سنج Thermo Nicolet مدل AVATAR 370 FT-IR به دست آمد. برای تهیه طیف فتولومینسانس (PL) نقاط کوانتومی کربن از دستگاه Perkinelmer Is45 استفاده شد. طیف جذبی و عبوری UV-vis با استفاده از دستگاه Hitachi مدل UH-4150 اندازه‌گیری شد. محلول تهیه شده برای

نتایج و بحث

مشخصه‌یابی نقاط کوانتومی کربن سنتز شده

تحلیل میکروسکوپی الکترونی عبوری (TEM) نقاط کوانتومی به همراه هیستوگرام توزیع اندازه ذرات در شکل ۳-الف ساختار کروی ذرات با اندازه متوسط ۳/۲۱ نانومتر را نشان می‌دهد. همچنین، تحلیل طیف‌سنجی پرتو ایکس با انرژی پراکنده (EDS or EDX) برای تأیید وجود عناصر موجود در ساختار نقاط کوانتومی کربن شامل کربن، نیتروژن و سدیم انجام شد. وجود عناصری مانند اکسیژن نیز به دلیل وجود گروه‌های عاملی اکسیژن در ساختار سنتز شده دیده می‌شود (شکل ۳-ب).



شکل ۳-الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نقاط کوانتومی کربن که پراکندگی ذرات و ساختار کروی آنها را نشان می‌دهد. ب) تحلیل طیف‌سنجی پرتو ایکس با انرژی پراکنده (EDS) نقاط کوانتومی کربن سنتز شده

است که با صفحه شبکه (۰۰۲) کربن گرافیتی سازگار است و حاکی از سنتز صحیح نقاط کوانتومی کربن است (Wei et al., 2020; Zhou et al., 2019). همچنین، پیک در ۱۷/۵ درجه، ۳۱ درجه، ۳۷/۱ درجه، ۴۱/۵ درجه و ۵۰/۷ درجه مربوط به صفحات شبکه (۲۰۰)، (۴۰۰)، (۱۱۱)، (۳۱۱) و (۰۲۰) ساختار بلورین NaOH فاز مونوکلینیک است (Wei et al., 2020).

برای نشان دادن ویژگی‌های نوری نقاط کوانتومی سنتز شده، طیف جذب و نشر ذرات اندازه‌گیری شد. هدف از این تحلیل، نشان دادن ویژگی‌های جذبی نقاط کوانتومی کربن در محدوده فرابنفش، که یک طیف مضر برای گلخانه است و همچنین ویژگی‌های نشر آنها در محدوده مرئی و اندازه‌گیری برخی از عوامل نوری مانند جابجایی استوکس است.

نوری (η_{opt}) از معادلات زیر استفاده شد (Mazzaro & Vomiero, 2018):

$$\eta = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_0} \quad (2)$$

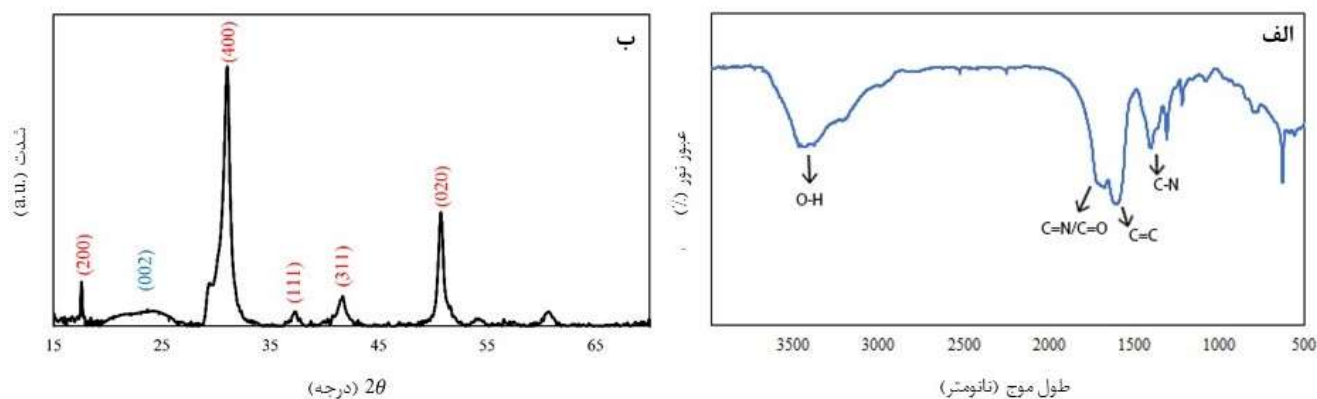
$$G = \frac{A_{top}}{A_{edge}} \quad (3)$$

$$\eta_{opt} = \frac{I_{LSC}}{I_{sc} G} \times 100 \quad (4)$$

در معادلات بالا، J_{sc} چگالی جریان، V_{oc} ولتاژ مدار باز و FF ضریب پرشدگی LSC، P_0 توان ورودی، A_{top} مساحت رویی LSC و A_{edge} مساحت لبه‌های LSC است. همچنین در معادله (۴)، I_{LSC} جریان اتصال کوتاه LSC و I_{sc} جریان اتصال کوتاه سلول خورشیدی متصل به موجر است.

برای بررسی وجود و نوع گروه‌های عاملی موجود بر روی سطح نقاط کوانتومی کربن تحلیل طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR) انجام شد (شکل ۴-الف). نوار در $3466/6 \text{ cm}^{-1}$ به ارتعاشات کششی گروه عاملی هیدروکسیل (-OH) مربوط می‌شود که وجود آنها را در سطح CQDها تأیید می‌کند (Wei et al., 2020). نوار در $1672/2 \text{ cm}^{-1}$ به ترتیب به کشش گروه‌های عاملی کربونیل (C=O) و C=N نسبت داده می‌شود (S. Lu, Sui, et al., 2017a). همچنین، نوار در $1599/96 \text{ cm}^{-1}$ و $1398/64 \text{ cm}^{-1}$ به پیوند گروه عاملی آلکن (C=C) و C-N مربوط می‌شود (Lu et al., 2017b; Zhao et al., 2021).

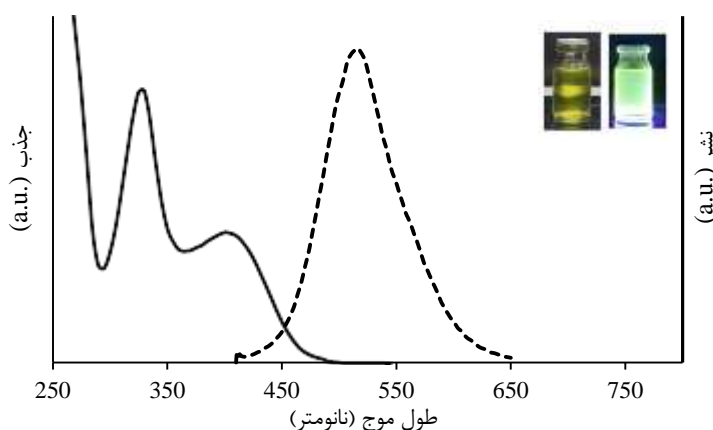
برای شناخت بیشتر ساختار نقاط کوانتومی کربن تحلیل پراش پرتو ایکس (XRD) انجام شد. با توجه به شکل ۴-ب، بیشترین مقدار پراش گسترده در حدود $24/6$ درجه



شکل ۴- الف) طیف تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR) و ب) الگوی پراش پرتوی ایکس (XRD) نقاط کوانتومی سنتز شده

کربن، نشر در ناحیه مرئی از ۴۱۰ نانومتر تا ۶۰۰ نانومتر با پیک نشر در ۵۱۸ نانومتر را نشان می‌دهد (شکل ۵). جذب کامل نور فرابنفش (به‌عنوان یک طیف مضر برای گیاه) و تبدیل آن به نور ناحیه مرئی (به‌عنوان یک طیف مفید برای گیاه) از طریق نشر، قابلیت ویژگی‌های نوری نقاط کوانتومی کربن سنتز شده را به‌عنوان یکی از ساختارهای بالقوه در توسعه پوشش‌های گلخانه‌ای فتولتاییکی نشان می‌دهد. هم‌چنین، جابجایی استوکس CQDهای سنتز شده در حدود 0.706 eV است. هر چه قدر جابجایی استوکس بزرگ‌تر باشد میزان تلفات نور جذب شده کمتر خواهد بود.

منحنی طیف جذب نشان می‌دهد که نقاط کوانتومی کربن دارای جذب در محدوده ۲۵۰ تا ۵۰۰ نانومتر است (شکل ۵). بیشترین میزان جذب در ۳۳۰ نانومتر و ۴۰۰ نانومتر به ترتیب به انتقال $\pi \rightarrow \pi^*$ و گذار $n \rightarrow \pi^*$ که ناشی از وجود پیوندهای C=O و C=N است، مربوط می‌شود (Huang *et al.*, 2019; Lu, *et al.*, 2017; Qu *et al.*, 2014; Wei *et al.*, 2020; Yoo *et al.*, 2019). جذب نقاط کوانتومی شامل جذب کامل ناحیه فرابنفش و بخشی از نور مرئی می‌شود که برای استفاده در پوشش‌های گلخانه‌ای فتولتاییکی مبتنی بر سلول‌های خورشیدی حساس به رنگدانه ویژگی بسیار خوبی محسوب می‌شود. طیف فتولومینسانس نقاط کوانتومی



شکل ۵- منحنی جذب (آبی) و نشر (سبز) نقاط کوانتومی کربن. تصویر داخلی مربوط به محلول حاوی نقاط کوانتومی کربن در زیر نور محیط و نور فرابنفش را نشان می‌دهد.

سطحی ناشی از انتقال $n \rightarrow \pi^*$ گروه‌های عاملی سطحی آن اتفاق بیفتد (Choi *et al.*, 2016; Qu *et al.*, 2016; Wei *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2019).

در مجموع جابجایی استوکس خوب می‌تواند به دلیل انفعال سطحی بسیار خوب نقاط کوانتومی کربن و نشر تابشی مناسب آن باشد که به دلیل تهییج حالت‌های

مشخصه‌یابی نوری و فتوولتاییکی متمرکز کننده‌های

خورشیدی لومینسانسی

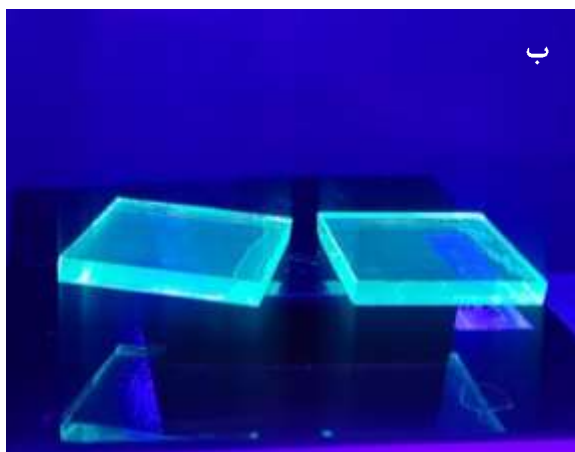
بررسی تأثیر عامل هندسی در بازده LSC

عامل هندسی یکی از مهمترین عوامل فیزیکی در بازده نوری LSC است. عامل هندسی عبارت است از نسبت مساحت رویی LSC به مساحت لبه‌های آن. بزرگتر بودن این عامل به معنای بزرگتر بودن مساحت رویی LSC نسبت به مساحت لبه‌های آن است که می‌تواند بر بازده نوری متمرکز کننده خورشیدی لومینسانسی تأثیرگذار باشد. از طرفی برای کاربردهای حوزه کشاورزی، از آنجایی که در نهایت یک LSC به عنوان یک پوشش فتوولتاییکی گلخانه‌ای در ابعاد بزرگ استفاده می‌شود، در ضخامت یکسان با افزایش مساحت رویی LSC، بازده نوری آن نیز دستخوش تغییر خواهد شد. همچنین محیط خشن کشاورزی و وجود آسیب‌های محیطی مختلف سبب می‌شود تا علاوه بر جنس، ضخامت LSC به گونه‌ای انتخاب شود تا در مقابل این آسیب‌های محیطی مقاوم و به عنوان یک صفحه فتوولتاییکی شفاف دارای طول عمر و پایداری مناسب باشد. به همین دلیل در این بخش به بررسی تأثیر ضخامت موجبر که موجب تغییر عامل عامل هندسی (G) می‌شود و بر روی بازده LSC اثر گذار است، پرداخته می‌شود.

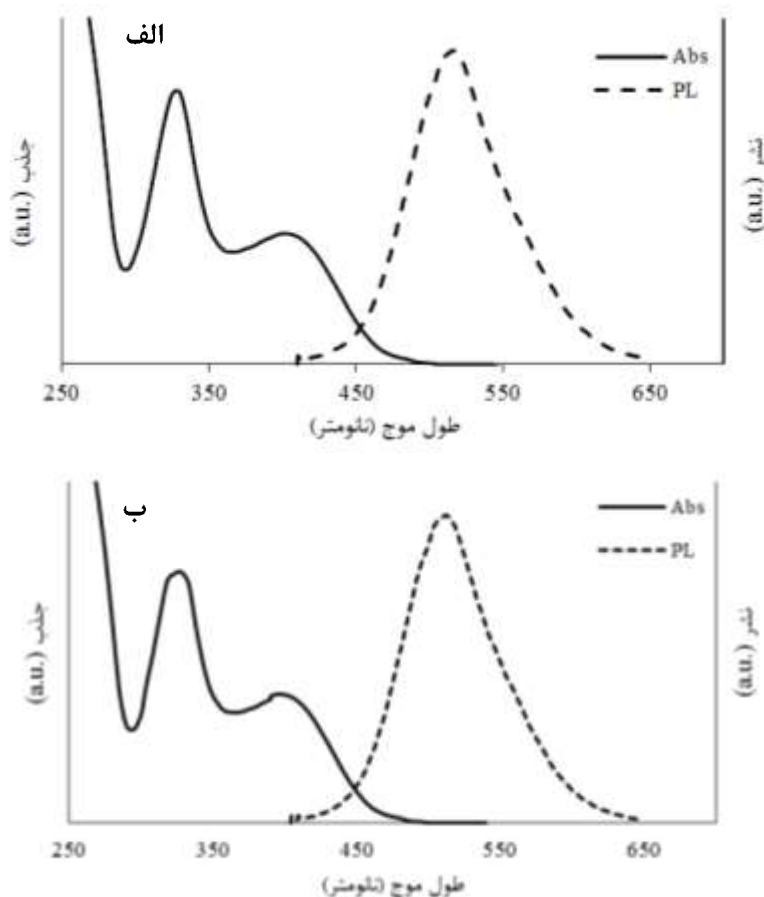
با توجه به ویژگی‌های یک LSC که نور نشر یافته در آن از طریق لبه‌ها به سلول خورشیدی می‌رسد، ضخامت لبه باید به اندازه‌ای باشد که امکان نصب سلول خورشیدی در آن وجود داشته باشد. بر همین اساس، در این کار از سه ضخامت ۴، ۵ و ۶ میلی‌متر برای بررسی تأثیر ضخامت

موجبر یا به عبارتی دیگر برای بررسی تأثیر عامل هندسی (G) بر روی بازده LSC انتخاب شدند. همان‌طور که در شکل ۶-الف دیده می‌شود، متمرکز کننده‌های ساخته شده از جنس شیشه و PMMA در سه ضخامت از شفافیت بالایی برخوردارند و نشر نور در این LSCها زیر نور فرابنفش به‌خوبی مشخص است (شکل ۶-ب). همچنین مقایسه طیف جذب و نشر LSCهای ساخته شده با ویژگی‌های جذب و نشر نقاط کوانتومی کربن نشان می‌دهد که تلفات نوری در ویژگی‌های جذبی و نشری و همچنین تغییری در محل پیک جذب و نشر LSC دیده نمی‌شود که حاکی از پایداری بسیاری عالی نقاط کوانتومی کربن در ساختار LSC است (شکل ۷).

اندازه‌گیری بازده نوری و فتوولتاییکی LSCها در سه ضخامت ۴، ۵ و ۶ میلی‌متر نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت، بازده نوری و بازده کلی (PCE) LSC نیز افزایش می‌یابد. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است LSC ساخته شده با موجبرهای با ضخامت ۶ میلی‌متر بهترین عملکرد را در بین سایر LSCها داشته‌اند. مقادیر ولتاژ مدار باز، چگالی جریان، ضریب پرشدگی، بازده نوری و بازده کلی برای موجبر از جنس PMMA با عامل هندسی $G = 2/0.83$ به ترتیب برابر با 0.52 ولت، $3/0.6 \text{ mA/cm}^2$ ، $63/0.2 \%$ ، $4/27 \%$ و 1 و برای موجبر از جنس شیشه با عامل هندسی $G = 2/0.83$ به ترتیب برابر با 0.52 ولت، $2/47 \text{ mA/cm}^2$ ، $60/157 \%$ ، $3/43 \%$ است. همچنین، منحنی جریان ولتاژ LSCهای ساخته شده در ضخامت‌های مختلف در دو جنس شیشه و PMMA در شکل ۸ آمده است.



شکل ۶-الف) تصویر LSCهای ساخته شده در سه ضخامت ۴، ۵ و ۶ میلی‌متر با دو جنس شیشه و PMMA (ب) نشر سبز رنگ LSCهای ساخته شده با موجبر شیشه‌ای و PMMA در ضخامت ۶ میلی‌متر.



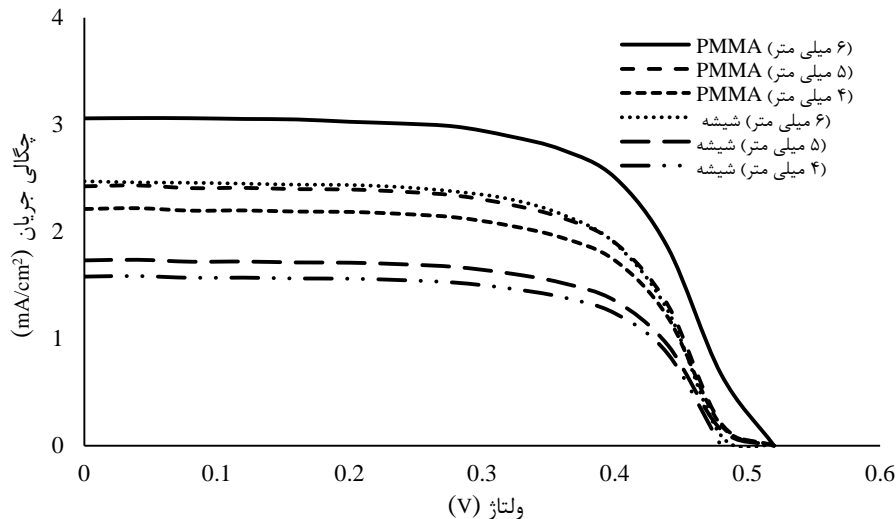
شکل ۷- الف) طیف جذب و نشر نقاط کوانتومی کربن در حالت محلول و ب) LSC ساخته شده با موجبر PMMA.

کمتر را می‌توان در تفاوت چگالی‌های جریان آنها مشاهده کرد، که با کاهش ضخامت، چگالی جریان نیز با افت معنادار روبه رو شده است (جدول ۱ و شکل ۸). بنابراین، در حالت کلی کاهش بازده نوری LSCها در ضخامت‌های ۴ و ۵ میلی‌متر تحت تأثیر افت معنادار چگالی جریان آنها بوده که به دلیل افزایش تلفات نوری رخ داده است.

بررسی نتایج از دیدگاه نوری نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت LSC، فضای بیشتری در اختیار نورهای نشر یافته قرار می‌گیرد و تا پیش از خروج نور از صفحه و افزایش تلفات نوری، احتمال رسیدن نور به سلول خورشیدی که در لبه LSC نصب شده است، بیشتر می‌شود، که این رخداد باعث افزایش بازده نوری می‌شود (Debije *et al.*, 2008). افزایش تلفات نوری در موجبرهای با ضخامت

جدول ۱- عوامل نوری و فتوولتاییکی LSCهای ساخته شده با موجبرهای شیشه و PMMA در سه ضخامت ۴، ۵ و ۶ میلی‌متر

عامل هندسی (G)	بازده کلی (PCE) (%)	بازده نوری (η_{opt}) (%)	ضریب پرتشدگی (FF) (%)	ولتاژ مدار باز (V)	چگالی جریان (mA/cm^2)	جنس موجبر / ضخامت
۳/۱۲	۰/۳۳	۰/۹۸	۶۵/۹۱	۰/۴۸	۱/۰۵	شیشه (۴ میلی‌متر)
۲/۵	۰/۴۵	۲/۰۱	۶۰/۸۴	۰/۵۲	۱/۴۴	شیشه (۵ میلی‌متر)
۲/۰۸۳	۰/۷۷	۳/۴۳	۶۰/۵۷	۲/۴۷	۰/۵۲	شیشه (۶ میلی‌متر)
۳/۱۲	۰/۴۶	۱/۳۷	۶۰/۸۴	۱/۴۷	۰/۵۲	PMMA (۴ میلی‌متر)
۲/۵	۰/۶۴	۲/۳۵	۶۰/۸۴	۲/۰۲	۰/۵۲	PMMA (۵ میلی‌متر)
۲/۰۸۳	۱	۴/۲۷	۶۳/۰۲	۳/۰۶	۰/۵۲	PMMA (۶ میلی‌متر)



شکل ۸- منحنی چگالی جریان - ولتاژ LSC ها ساخته شده با دو جنس موجبر شیشه و PMMA در ضخامت‌های مختلف

وابسته هستند. معادله (۷) نیز مربوط به احتمال رسیدن نور تابشی به لبه LSC است (Wilson, 2010). با توجه به نوع کاربری LSC در این پژوهش که برای استفاده به عنوان پوشش فتوولتاییکی مخصوص گلخانه است، انتخاب موجبرها از دو منظر کشاورزی و فتوولتاییکی انجام شده است. به عبارتی دیگر، موجبر هم باید الزامات یک پوشش گلخانه‌ای را داشته باشد و هم الزامات یک ابزار فتوولتاییکی را که در اینجا LSC است، رعایت کند. از دیدگاه فتوولتاییکی، برای ساخت یک LSC، موجبر باید دارای ضخامت کافی (حداقل ۴ میلی‌متر) برای نصب سلول خورشیدی در لبه‌ها، استحکام خوب، پایداری نوری بالا و ضریب شکست نوری در محدوده ۱/۳ تا ۱/۵ باشد (Wilson, 2010). از دیدگاه کشاورزی نیز، پوشش گلخانه‌ای باید دارای شفافیت در محدوده PAR (محدوده مرئی طیف خورشیدی)، استحکام کافی و سازگار با شرایط خشن محیط‌های کشاورزی باشد. با در نظر گرفتن این معیارها و پوشش‌های رایج گلخانه‌ای که اغلب در گلخانه‌ها استفاده می‌شود، دو جنس شیشه و PMMA (نام تجاری: پلکسی گلاس) استفاده شد. این دو پوشش ضمن داشتن شفافیت قابل قبول، استحکام نوری و مکانیکی و طول عمر بالا، در ضخامت‌های مختلفی هم می‌توانند استفاده شوند و با معیارهای پوشش‌های گلخانه‌ای و موجبر LSC همخوانی دارند.

برای بررسی تأثیر ضریب شکست نوری با دو جنس شیشه و PMMA LSC هایی با ابعاد $0.6 \times 5 \times 5$ cm³ ساخته شدند. از آنجایی که در بخش قبلی ضخامت ۶ میلی‌متر

بررسی تأثیر ضریب شکست نوری موجبرها

ضریب شکست نوری یکی دیگر از عوامل مهم در انتخاب نوع موجبر در ساخت LSC است. در زمان ورود نور به داخل موجبر، در صورتی که زاویه تابش از زاویه بحرانی (رابطه ۵) بزرگ‌تر باشد، این تابش می‌تواند به عنوان یک تابش نوری مفید قلمداد شود، اما در صورتی که زاویه تابش نور کوچک‌تر از زاویه بحرانی باشد، جزء تلفات نوری محسوب می‌شود. این نوع از تلفات نوری (معادله ۶) که در زمان ورود نور به داخل موجبر رخ می‌دهد، یکی از مهم‌ترین تلفات در موجبر است و برای محاسبه آن باید مقدار احتمال بازتاب داخلی یا P_{TIR} محاسبه شود (معادله ۷). P_{TIR} در واقع احتمال رسیدن درصدی از نور تابشی به لبه‌های LSC را مشخص می‌کند و از طریق معادله (۶) و با استفاده از مقدار P_{TIR} می‌توان تلفات نوری که موجبر خارج می‌شود و به لبه‌های LSC نخواهد رسید را تعیین کرد. مطابق معادله (۶) و معادله (۷) مقدار این تلفات با کاهش ضریب شکست نوری افزایش می‌یابد. بنابراین، انتخاب ضریب شکست مناسب که در تعیین نوع جنس موجبر نمود می‌کند، در ساخت LSC بسیار مهم است.

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right) \quad (5)$$

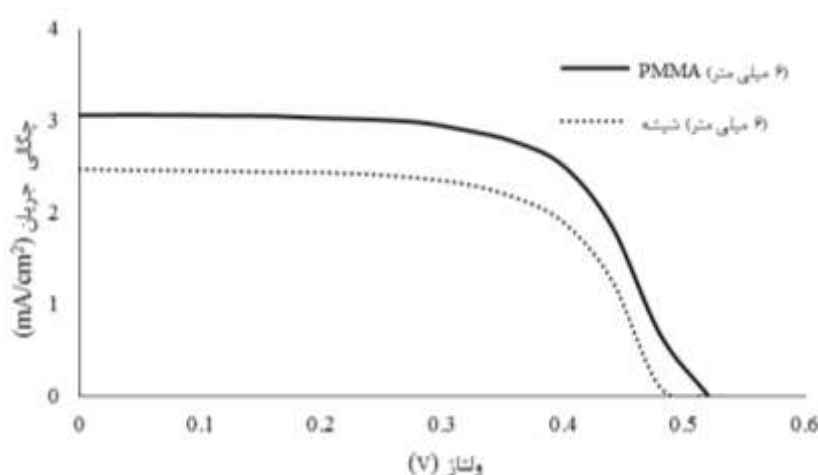
$$\eta_{Escap\ cone} = 1 - P_{TIR} \quad (6)$$

$$P_{TIR} = \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n} \quad (7)$$

در معادلات بالا، معادله (۵) مربوط به زاویه بحرانی و معادله (۶) مربوط به بازده تلفات نوری ناشی از خروج نور از صفحه است که هر دو به مقدار ضریب شکست (n)

که در موجبر با جنس شیشه حدود ۳۵ درصد و در موجبر با جنس PMMA حدود ۲۷ درصد تلفات نوری را به خود اختصاص داده است. از آنجایی که سهم عمده تلفات نوری مربوط به تلفات مخروط ناقص است (Debije *et al.*, 2008) به نظر می‌رسد این اختلاف در مقادیر بازده‌ها در دو جنس از این موضوع ناشی شود. البته این مقدار تنها مربوط به تلفات نوری مخروط ناقص در LSC است و در حالت کلی غیر از تلفات نوری مخروط ناقص، جذب نور توسط خود موجبر، بازتابش نور از صفحه، پراکندگی نوری پایین در موجبر، باز جذب بخشی از نور توسط خود مولکول‌های لومینفور و همچنین تفاوت در سختی سطح و ساختار بلوری موجبر با توجه نوع جنس آن می‌تواند در تشدید تلفات نوری موثر باشد (Debije *et al.*, 2008; McDowall *et al.*, 2013; Wilson, 2010)

بهترین عملکرد را از نظر بازده نوری و فتوولتاییکی بین LSC‌های ساخته شده داشت، بررسی‌های مربوط به ضریب شکست بین دو جنس شیشه و PMMA بر روی LSC با ضخامت ۶ میلی‌متر انجام شد. نتایج فتوولتاییکی و نوری LSC‌های ساخته شده نشان می‌دهد که بازده LSC‌های مبتنی بر موجبر PMMA به صورت معناداری بالاتر از LSC‌های مبتنی بر موجبر شیشه است (جدول ۱ و شکل ۹). از آنجایی این تفاوت بازده ناشی از جنس موجبر است، برای درک بهتر این تفاوت و یافتن منشاء آن، ضرایب شکست نوری هر دو جنس با منبع نوری محاسبه شدند. نتایج اندازه‌گیری‌های مربوط به ضریب شکست نشان داد که ضریب شکست شیشه برابر با ۱/۳۲ و برای PMMA برابر با ۱/۴۶ است. با بررسی تلفات نوری عمده که اغلب به صورت خروج نور از موجبر است، می‌توان متوجه شد



شکل ۹- منحنی چگالی جریان-ولتاژ LSC‌های ساخته شده با موجبر شیشه و PMMA در ضخامت ۶ میلی‌متر

متمرکز کننده‌های خورشیدی لومینسانسی (LSC) به دلیل ویژگی‌های بارز آن، قابلیت استفاده به عنوان پوشش‌های شفاف فتوولتاییکی مخصوص گلخانه را دارد. در این فناوری، موجبر به‌عنوان یکی از اجزاء مهم آن نقش کلیدی در تعیین ویژگی‌های LSC دارد. از این رو بهینه سازی و اصلاح آن می‌تواند در دستیابی به بازده بالاتر در LSC نقش حیاتی داشته باشد. ضریب شکست نوری (n) و عامل هندسی (G) دو ویژگی بسیار مهم در موجبر LSC است که اصلاح این دو عامل فیزیکی می‌تواند LSC با عملکرد بالاتر را نتیجه دهد. به همین دلیل، در این پژوهش بر اساس این رویکرد و اهمیت موجبر در ساخت LSC، به بررسی تأثیر این دو عامل از طریق ابعاد و

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با توجه به اهمیت و نقش انرژی‌های تجدیدپذیر و به‌ویژه فتوولتاییک در تأمین انرژی گلخانه‌ها و نیاز گلخانه‌های نوین مبتنی بر سامانه‌های کشت پیشرفته مانند کشت عمودی و ترکیب آنها با روش‌های آب‌کشت و هواکشت به انرژی بسیار بیشتر در مقایسه با روش‌های سنتی تولید غذا، سبب شده است تا در سال‌های اخیر از فناوری سلول‌های خورشیدی و ابزارهای فتوولتاییکی شفاف به‌عنوان پوشش‌های شفاف فتوولتاییکی گلخانه‌ای با هدف توسعه نیروگاه‌های دائمی و دوست‌دار محیط زیست برای تأمین تمام یا بخشی از انرژی موردنیاز گلخانه‌ها استفاده شود. در این میان،

- photovoltaics shading on the growth of chili pepper in controlled greenhouses. *Heliyon*, 8(2): e08877.
- Huang, S., Yang, E., Yao, J., Chu, X., Liu, Y., Zhang, Y., & Xiao, Q. (2019). Nitrogen, cobalt co-doped fluorescent magnetic carbon dots as ratiometric fluorescent probes for cholesterol and uric acid in human blood serum. *ACS Omega*, 4(5): 9333–9342.
- Kim, J. J., Kang, M., Kwak, O. K., Yoon, Y. J., Min, K. S., & Chu, M. J. (2014). Fabrication and characterization of dye-sensitized solar cells for greenhouse application. *International Journal of Photoenergy*, 2014(II).
<https://doi.org/10.1155/2014/376315>
- Lages Barbosa, G., Almeida Gadelha, F. D., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G. M., & Halden, R. U. (2015). Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6): 6879–6891.
- Li, C., Chen, W., Wu, D., Quan, D., Zhou, Z., Hao, J., Qin, J., Li, Y., He, Z., & Wang, K. (2015). Large Stokes Shift and High Efficiency Luminescent Solar Concentrator Incorporated with CuInS₂/ZnS Quantum Dots. *Scientific Reports*, 5(1): 17777.
- Liu, G., Mazzaro, R., Sun, C., Zhang, Y., Wang, Y., Zhao, H., Han, G., & Vomiero, A. (2020). Role of refractive index in highly efficient laminated luminescent solar concentrators. *Nano Energy*, 70: 104470.
- Lu, L., Effendy Ya'acob, M., Shamsul Anuar, M., & Nazim Mohtar, M. (2022). Comprehensive review on the application of inorganic and organic photovoltaics as greenhouse shading materials. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52: 102077.
- Lu, L., Ya'acob, M. E., Anuar, M. S., Chen, G., Othman, M. H., Noor Iskandar, A., & Roslan, N. (2020). Thermal analysis of a portable DSSC mini greenhouse for botanical drugs cultivation. *Energy Reports*, 6: 238–253.
- Lu, S., Sui, L., Liu, J., Zhu, S., Chen, A., Jin, M., & Yang, B. (2017a). Near-infrared photoluminescent polymer-carbon nanodots with two-photon fluorescence. *Advanced Materials*, 29(15): 1603443.
- Lu, S., Xiao, G., Sui, L., Feng, T., Yong, X., Zhu, S., Li, B., Liu, Z., Zou, B., & Jin, M. (2017b). Piezochromic carbon dots with two-photon fluorescence. *Angewandte Chemie*, 129(22): 6283–6287.
- Mazzaro, R., & Vomiero, A. (2018). The جنس موجبر پرداخته شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که با کاهش مقدار عامل هندسی (G) از طریق افزایش ضخامت موجبر به ۶ میلی‌متر و انتخاب موجبر از جنس PMMA با ضریب شکست بالاتر (۱/۴۶) در مقایسه با شیشه، می‌تواند موجب بهبود PCE و بازدهی نوری LSC به ترتیب تا بیش از ۳ و ۴ برابر شود.
- ### سپاسگزاری
- نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از دانشگاه فردوسی مشهد و همچنین صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران ایران (INSF) به شماره طرح ۹۹۰۱۲۶۹۱ بخاطر حمایت مادی و معنوی از این پژوهش اعلام کنند.
- ### منابع
- Allardyce, C. S., Fankhauser, C., Zakeeruddin, S. M., Grätzel, M., & Dyson, P. J. (2017). The influence of greenhouse-integrated photovoltaics on crop production. *Solar Energy*, 155: 517–522.
- Avgoustaki, D. D., & Xydis, G. (2021). Energy cost reduction by shifting electricity demand in indoor vertical farms with artificial lighting. *Biosystems Engineering*, 211: 219–229.
- Benetti, D., & Rosei, F. (2022). Alternative Uses of Luminescent Solar Concentrators. *Nanoenergy Advances*, 2(3): 222–240.
- Choi, Y., Kang, B., Lee, J., Kim, S., Kim, G. T., Kang, H., Lee, B. R., Kim, H., Shim, S.-H., & Lee, G. (2016). Integrative approach toward uncovering the origin of photoluminescence in dual heteroatom-doped carbon nanodots. *Chemistry of Materials*, 28(19): 6840–6847.
- Corrado, C., Leow, S. W., Osborn, M., Carbone, I., Hellier, K., Short, M., Alers, G., & Carter, S. A. (2016). Power generation study of luminescent solar concentrator greenhouse. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 8(4): 43502.
- Debije, M. G., Verbunt, P. P. C., Rowan, B. C., Richards, B. S., & Hoeks, T. L. (2008). Measured surface loss from luminescent solar concentrator waveguides. *Appl. Opt.*, 47(36): 6763–6768.
- Essahili, O., Ouafi, M., & Moudam, O. (2022). Recent progress in organic luminescent solar concentrators for agrivoltaics: Opportunities for rare-earth complexes. *Solar Energy*, 245: 58–66.
- Hassanien, R. H. E., Ibrahim, M. M., Ghaly, A. E., & Abdelrahman, E. N. (2022). Effect of

- Renaissance of Luminescent Solar Concentrators: The Role of Inorganic Nanomaterials. *Advanced Energy Materials*, 8(33): 1801903.
- McDowall, S., Butler, T., Bain, E., Scharnhorst, K., & Patrick, D. (2013). Comprehensive analysis of escape-cone losses from luminescent waveguides. *Appl. Opt.*, 52(6): 1230–1239.
- Ntinias, G. K., Kadoglidou, K., Tsivelika, N., Krommydas, K., Kalivas, A., Ralli, P., & Irakli, M. (2019). Performance and hydroponic tomato crop quality characteristics in a novel greenhouse using dye-sensitized solar cell technology for covering material. *Horticulturae*, 5(2).
- Qu, S., Liu, X., Guo, X., Chu, M., Zhang, L., & Shen, D. (2014). Amplified spontaneous green emission and lasing emission from carbon nanoparticles. *Advanced Functional Materials*, 24(18): 2689–2695.
- Qu, S., Zhou, D., Li, D., Ji, W., Jing, P., Han, D., Liu, L., Zeng, H., & Shen, D. (2016). Toward efficient orange emissive carbon nanodots through conjugated sp²-domain controlling and surface charges engineering. *Advanced Materials*, 28(18), 3516–3521.
- Sychugov, I. (2020). Geometry effects on luminescence solar concentrator efficiency: analytical treatment. *Appl. Opt.*, 59(19): 5715–5722.
- Wei, J., Lou, Q., Zang, J., Liu, Z., Ye, Y., Shen, C., Zhao, W., Dong, L., & Shan, C. (2020). Scalable synthesis of green fluorescent carbon dot powders with unprecedented efficiency. *Advanced Optical Materials*, 8(7): 1901938.
- Wilson, L. R. (2010). Luminescent solar concentrators: a study of optical properties, re-absorption and device optimisation. Heriot-Watt University Edinburgh.
- Yoo, H. J., Kwak, B. E., & Kim, D. H. (2019). Self-quenching origin of carbon dots and the guideline for their solid-state luminescence. *The Journal of Physical Chemistry C*, 123(44): 27124–27131.
- Zhao, H., Liu, G., You, S., Camargo, F. V. A., Zavelani-Rossi, M., Wang, X., Sun, C., Liu, B., Zhang, Y., & Han, G. (2021). Gram-scale synthesis of carbon quantum dots with a large Stokes shift for the fabrication of eco-friendly and high-efficiency luminescent solar concentrators. *Energy & Environmental Science*, 14(1): 396–406.
- Zhou, D., Jing, P., Wang, Y., Zhai, Y., Li, D., Xiong, Y., Baranov, A. V., Qu, S., & Rogach, A. L. (2019). Carbon dots produced via space-confined vacuum heating: maintaining efficient luminescence in both dispersed and aggregated states. *Nanoscale Horizons*, 4(2): 388–395.